



**Красникова Наталья Михайловна**

**СУХИЕ СМЕСИ ДЛЯ НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре технологии строительных материалов, изделий и конструкций Казанского государственного архитектурно – строительного университета

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Хозин Вадим Григорьевич
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор Изотов Владимир Сергеевич  кандидат технических наук, доцент Бурьянов Александр Федорович
Ведущая организация	Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Защита состоится 20 декабря 2010 года в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.077.01 при Казанском государственном архитектурно – строительном университете по адресу: 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1, КазГАСУ, ауд. 3-203

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного архитектурно – строительного университета.

Автореферат разослан « 15 » ноября 2010 г

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000681307

Ученый секретарь диссертационного совета  
д.т.н., профессор

Л.А. Абдрахманова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Неавтоклавный пенобетон является многофункциональным строительным материалом, получаемым из недорогого и доступного сырья. Его технология относительно проста, оборудование малометалло – и энергоемко. В штучных изделиях и монолитных конструкциях этот материал наилучшим образом адаптирован к сложным климатическим и экономическим условиям России, имея широкий интервал средней плотности ( $\gamma=100-1200 \text{ кг/м}^3$ ), низкую теплопроводность ( $\lambda=0.08-0.38 \text{ Вт/м} \cdot \text{С}^0$ ), пониженное водопоглощение ( $W=8-22 \%$ ), высокую огнестойкость. Однако, его структурная прочность ниже на два – три класса, чем у автоклавного газобетона, а влажностная усадка в 2 – 4 раза выше. Эти недостатки весьма существенны и, вплоть до настоящего времени, сдерживают его производство и широкое применение в строительстве, уступающее автоклавному газобетону, хотя металлоемкость и энергозатратность технологии последнего многократно выше.

Идеологической основой конкурентоспособной технологии пенобетона может стать принцип производства строительных материалов из предварительно приготавливаемых сухих смесей. Их неоспоримыми достоинствами являются высокая точность дозирования и высокая степень гомогенизации компонентов, обеспечивающие стабильность технологических и эксплуатационно-технических свойств материала.

Применение сухих «пенобетонных» смесей открывает возможность производства изделий (блоков, плит и др.) и монолитных конструкций по предельно простой технологии: смешению с водой и заливке пенобетонной смеси в формы или опалубку непосредственно на строительной площадке. В результате этого можно ожидать сокращения продолжительности строительного процесса и снижения стоимости готового объекта, в частности жилых домов.

Перспективность применения сухих строительных смесей для производства пенобетона в настоящее время обусловлена курсом на малозэтажное строительство (национальные приоритеты России – федеральные программы: «Доступное и комфортное жилье – гражданам России», «Жилище»). Учитывая рассредоточенность больших и малых поселений на территории России, использование сухих смесей для производства стеновых блоков и монолитных стен домостроения, особенно в сельской местности, представляется наиболее целесообразным способом реализации этих проектов.

Анализ современного состояния производства сухих строительных смесей у нас и за рубежом показал, что, при всем их разнообразии, смеси для получения пенобетона среди них отсутствуют.

**Цель работы:** Разработка составов и технологии изготовления сухих смесей для производства неавтоклавного пенобетона.

**Задачи исследования:**

- 1) разработать способы получения сухой формы пенообразователей из водных растворов промышленных ПАВ и выбрать оптимальный;
- 2) разработать технологическую схему получения активированной сухой смеси для пенобетона (ССПБ) и оптимизировать ее состав;

3) изучить дисперсный состав ССПБ (распределение частиц по размерам - РЧР) при различных вариантах составов и условиях помола и его влияние на кинетику гидратации портландцемента в пенобетонах.

4) исследовать технологические свойства пенобетонных смесей из ССПБ и основные физико – технические свойства неавтоклавных пенобетонов на их основе.

5) разработать технические условия на сухую смесь для пенобетона и технологический регламент производства пенобетона на ее основе.

#### **Научная новизна:**

1) Предложен и реализован принцип получения неавтоклавного пенобетона из сухой смеси, включающий процессы перевода водного раствора пенообразователя в твердую фазу и механоактивации вяжущего путем совместного помола всех компонентов, позволяющий повысить прочность и снизить влажностную усадку при твердении.

2) Выявлен синергизм влияния смеси пластификаторов С-3 и ЛСТ с пенообразователем ПБ-2000 на снижение поверхностного натяжения их водных растворов. Установлена прямая зависимость между величиной поверхностного натяжения водных растворов пенообразователей и кратностью полученной из них пены.

3) Выявлена экстремальная зависимость размолоспособности портландцемента от концентрации: пенообразователей, пластификаторов и их смесей. Установлено, что все они являются эффективными интенсификаторами помола портландцемента в шаровой и вибрационной мельницах, увеличивая размолоспособность на 10 и 20%, соответственно, и лучшим из них является пенообразователь ПБ-2000. При помоле в пружинной мельнице эти ПАВ оказывают обратное действие, снижая размолоспособность на 20%.

#### **Практическое значение работы:**

1) Предложены составы и технология получения сухого пенообразователя на основе промышленных ПАВ, защищенные патентом РФ № 2342347 «Способ приготовления сухого тонкодисперсного пенообразователя и способ приготовления сухой сырьевой смеси для пенобетона с использованием этого пенообразователя».

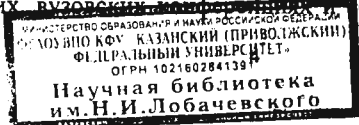
2) Получен пенобетон из разработанной сухой смеси, превосходящий по свойствам пенобетон, получаемый по традиционным схемам производства.

3) Разработаны технические условия на сухие смеси для неавтоклавного пенобетона и технологические регламенты производства сухих смесей и пенобетона на их основе.

Достоверность результатов и обоснованность выводов обеспечиваются достаточным объемом воспроизводимых экспериментальных данных, полученных современными методами исследований, и их взаимной корреляцией, использованием статистических методов при обработке экспериментальных данных. Выводы и практические результаты подтверждены положительными результатами испытаний разработанных составов и предложенной технологии.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, вузовских конференциях и семинарах: республиканских на-



учных конференциях по проблемам архитектуры и строительства (Казань:КГАСУ, 2008, 2009, 2010), международном конгрессе «Наука и инновации в строительстве» (Воронеж: ВГАСУ, 2008), XV академических чтениях РААСН – Международной научно – технической конференции «Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии» (Казань:КГАСУ, 2010), всероссийской научно – практической конференции «Строительное материаловедение сегодня: актуальные проблемы и перспективы развития» (Челябинск,2010).

**Реализация работы:** В 2009 году работа награждена дипломом в номинации «СТАРТ 1» по программе инновационных проектов «Идея - 1000», выиграны грант государственной некоммерческой организации «Инвестиционно- венчурный фонд Республики Татарстан» (2009) и грант государственной некоммерческой организации РФ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (2009). Результаты исследований использованы при разработке проекта Технических условий «Сухие смеси для неавтоклавного пенобетона. ТУ 5745-001-60222454-2010» В рамках проекта «СТАРТ 1» создано предприятие ООО «КРАС» для производства сухих смесей для пенобетона.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 работ, в т.ч. 2 статьи опубликованы в журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК РФ. Получен патент РФ № 2342347 с приоритетом от 18.01.2007.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и 2 приложений. Изложена на 177 страницах машинописного текста, включающего 48 таблиц, 57 рисунков, список литературы из 148 наименований.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры ТСМИК за интерес к работе и благожелательное отношение, сотрудникам ЦНИИГеолнеруд, сотрудникам кафедры геологии Казанского ПФУ (КГУ), оказавшим помощь при выполнении исследований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, приведены цель и задачи исследований, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен анализ современного состояния технологии производства неавтоклавных пенобетонов, обоснованы цель и задачи исследований и научные подходы к ним.

Показано, что существующим технологиям производства пенобетона (классическая, сухая минерализация, баротехнология) присущи нестабильность получаемой ячеистой структуры и свойств материала, и общий недостаток - повышенная влажность пенобетона (ввиду высоких значений исходного В/Т) и, вследствие этого, большая усадка (в основном влажностная) при длительном твердении.

В связи с этим представляется целесообразной новая технологическая схема производства неавтоклавного пенобетона, способная исключить структурную нестабильность пенобетонной смеси и свойств самого пенобетона и позволяющая получать заданную плотность, высокую прочность и морозостойкость материала при малой усадке. Ее основой может стать принцип производства строительных

материалов из предварительно приготовленных сухих смесей. В этом случае гарантируется высокая точность дозирования и степень гомогенизации компонентов, что, в свою очередь обеспечит стабильность технологических и эксплуатационно-технических свойств конечного материала. Сегодня технология производства строительных работ с применением сухих строительных смесей и само их заводское производство широко распространено в России, благодаря мощной экспансии фирмы КНАУФ, хотя бетонные смеси, готовые к употреблению (БСС – бетонные смеси сухие) были известны еще в Советском Союзе и производились в соответствии с ГОСТ7473.

Существующие технологии производства строительных сухих смесей (ССС) основаны на точном дозировании и тщательном перемешивании сухих компонентов (вяжущего, минеральных и органических функциональных добавок). В эту технологию можно «вписать» и механоактивацию вяжущего, в частности, портландцемента, добавив его домол совместно с другими добавками, часть из которых, а именно ПАВ, согласно теории Ребиндера, могут выполнять роль интенсификаторов измельчения.

Однако, при производстве сухих смесей для пенобетона необходимо учитывать, что практически все промышленные пенообразователи выпускаются в жидкой товарной форме в виде водных растворов. Поэтому должна быть решена задача их перевода в сухое твердое состояние. Известны успешные работы под руководством д.т.н., проф. Черкасова В.Д. и д.т.н., проф. Строковой В.В, в которых жидкие пенообразователи переводятся в сухое состояние путем выпаривания и используется комплексный порообразователь(газо-, пенообразователи) для механохимической поризации смеси. Однако, данные способы получения сухой смеси достаточно сложны. В данной работе обосновываются целесообразность и возможность изготовления сухой смеси для пенобетона путем совместного помола всех компонентов.

Во второй главе приведены характеристики используемых материалов и применяемых методов исследований.

В качестве вяжущего использовался портландцемент ПЦ500-Д0-Н ГОСТ 10178-85 (ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108-2003) бездобавочный и нормируемого состава клинкера Вольского и Мордовского цементных заводов, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 25485-89 «Бетоны ячеистые. ТУ».

В качестве синтетических пенообразователей были взяты:

- ПБ-2000 - водный раствор солей алкилсульфатов первичных жирных спиртов со стабилизирующими добавками, ТУ 2481-185-05744685-01,
- ПО – 6 ЦТ, ПО – 6ТС, ПО – 6МТ - водные растворы триэтаноламиновых солей первичных алкилсульфатов со стабилизирующими добавками, ТУ 0258-148-05744683-98.

В качестве белкового пенообразователя использовали:

- «Адимент» (Германия) - водный раствор аминокислот животного происхождения.

В качестве пластификаторов применяли:

- суперпластификатор С-3, ТУ 6-36-0204229-625-90.

- гиперпластификатор Melflux 2641 F производства Degussa Construction Polymers (SKW Trostberg, Германия) на основе модифицированного полиэфиркарбоната.

- пластификатор ЛСТ - лигносульфонат технический Соликамского ЦБК марки 7067/01, ТУ 81-04-225-79.

Для определения свойств сухих пенобетонных смесей, пенобетона использовались как стандартные методики и оборудование, регламентируемые нормативными документами, так и нестандартные, отвечающие задачам исследований и обеспечивающие необходимую точность и надежность – оптическая микроскопия (поляризационный микроскоп Axioskop 40 A Pol) и электронная (электронный микроскоп (ПЭМ)ЭММА4), дисперсионный анализ (лазерный анализатор частиц «HORIBA LA – 950»), рентгенофазовый анализ (дифрактометр Bruker D8), кондуктометрия и др.

Третья глава посвящена разработке способов получения сухих смесей. Исходя из предложенного принципа получения пенобетона, его технология делится на две стадии: первая – приготовление сухой смеси, состоящей из вяжущего, пенообразователя, наполнителя (и заполнителя) и вторая – приготовление пенобетонной смеси путем ее затворения водой и перемешивания (при этом происходит поризация вяжущего – пластической смеси). В свою очередь, первым этапом получения сухой смеси должен стать перевод жидкого пенообразователя в сухое состояние, а вторым – его смешение с другими твердыми компонентами (цементом, наполнителем, пластификатором и др.).

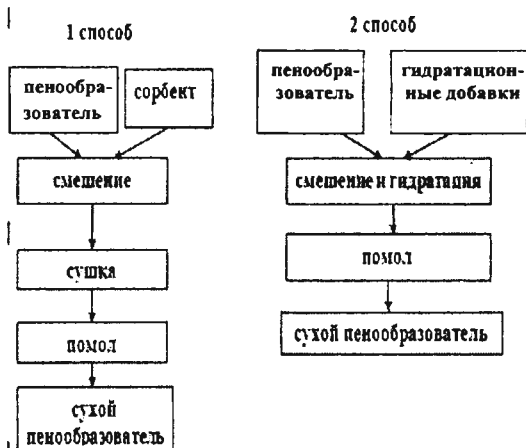


Рис.1. Способы получения сухих пенообразователей на основе водных растворов промышленных ПАВ

Рассмотрены два способа превращения водных растворов пенообразователей в сухую форму (рис.1): сорбционный и гидратационный. Для первого способа в качестве сорбентов выбраны мел и ЦСП (цеолитсодержащая порода), а для второго в качестве гидратационных добавок – известь негашеная, полуводный гипс и портландцемент. Выявлено, что во всех случаях применения сухих пенообразователей на минеральных носителях полученные пенобетоны по прочности превосходят контрольный пенобетон, изготовленный по классической технологии на жидком пенообразователе.

Эксперименты показали, что гидратационный способ перевода водных растворов ПО в твердое состояние позволяет получить большую (на 20 -30 %) прочность пенобетона по сравнению с контрольным на жидком пенообразователе. Наи-

большой эффект обнаруживается при применении портландцемента в качестве химического реагента, связывающего воду пенообразователя, и поэтому он был принят для последующего применения при изготовлении сухой смеси.

Любая пенобетонная масса, как дисперсная система, имеет определенную жизнеспособность, к исчерпанию которой цементная матрица должна выдерживать свой собственный вес – иначе начнется процесс осадки пеномассы. Вид и природа пенообразователя, существенно влияют на то, как скоро твердеющий цемент способен будет «подставить плечо» теряющей стойкость пене. Поэтому было изучено влияние пяти видов жидких промышленных пенообразователей (ПБ-2000, Адимент, ПО -6ЦТ, ПО – 6ТС, ПО – 6МТ) на сроки схватывания цемента. Установлено, что пенообразователи (ПО-6ЦТ, ПО- 6ТС, МТ) оказывают тормозящее действие на структурообразование цементного камня, увеличивая начало схватывания на 40 мин, а конец – на 2 ч, что очевидно обусловлено адсорбцией молекул этих ПАВ на активных центрах зерен цемента. В отличие от них синтетический пенообразователь ПБ-2000 и белковый «Адимент» существенно сокращают сроки схватывания цемента: начало - на 30 мин, конец - на час. Этот эффект объясняется наличием в составе «Адимента» хлорида кальция, а в ПБ-2000 - водорастворимых сульфатов, которые, как известно, являются ускорителями твердения цемента.

В связи с этим, далее в работе использовались ПБ-2000 и Адимент.

Прочность пеноцементных композиций должна повышаться с уменьшением их водосодержания при введении пластификаторов. Но этот способ дает положительные результаты только, если их введение не приводит к разрушению пены. Поэтому было, изучено влияние пластификаторов на кратность водной пены с целью обоснованного выбора наиболее эффективных пластификаторов. Результаты приведены в табл.1 (в числителе - на «чистой» воде, в знаменателе – на водной "вытяжке" из цемента).

Таблица 1

Влияние пластификаторов на кратность пены

Пенообразователь	Без пластификатора	Наименование и количество пластификаторов								
		С-3			Melflux			ЛСТ		
		0,5 %	1%	2%	0,5%	1%	2%	0,5%	1%	2%
ПБ-2000	8,5	8,5	9,0	9,0	8,5	8,0	7,5	11	11	10,0
	7,5	7,5	7,5	8,0	7,0	6,5	6,0	9,0	9,0	8,5
Адимент	3,5	3,5	3,0	2,9	3,8	3,8	3,6	3,3	3,2	3,0
	2,1	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0

Как видно из данных табл.1, что все три пластификатора мало влияют на кратность пен, но в случае применения ПБ-2000, предпочтение следует отдать С-3 и ЛСТ.

Образование пен, как известно, обусловлено снижением поверхностного натяжения жидкости на границе раздела с воздухом. Это – главный физико – химический фактор эффективности пенообразователя. Влияние пенообразователей и пластификаторов на поверхностное натяжение ( $\sigma$  мН/м) воды и водной «вытяжки» цемента представлены на рис.2 и 3 в виде концентрационных зависимостей.



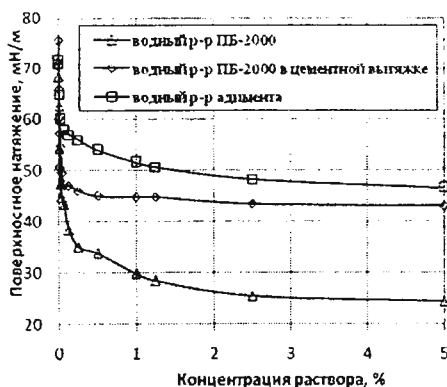


Рис.2. Влияние пенообразователей на поверхностное натяжение воды и водной «вытяжки» из цемента

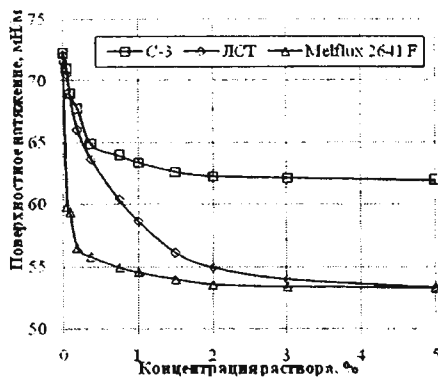


Рис.3. Влияние пластификаторов на поверхностное натяжение воды

В области небольших концентраций растворов ПАВ (рис.2) наблюдается линейный участок (область Генри), который описывается уравнением:  $\sigma_0 - \sigma = Kc$ , где  $\sigma_0$  – поверхностное натяжение воды,  $\sigma$  – поверхностное натяжение раствора,  $K$  – константа,  $c$  – концентрация ПАВ. В образцах: раствор ПБ-2000 в воде и раствор ПБ-2000 в цементной «вытяжке» этот линейный участок охватывает 4 точки при  $c$  от 0 до 0.0039 %,  $K = -452102.5$  и  $-389271.8$ , соответственно. В водном растворе Адимента этот участок еще короче – три точки,  $K = -353846.1$ . При средних концентрациях раствора зависимость изображается параболической кривой, описываемой эмпирической формулой Шишковского:  $\sigma_0 - \sigma = a \ln(1 + bc)$ , где  $a$  и  $b$  – постоянные величины. В области концентраций больше 2,5 % поверхностное натяжение не изменяется. Во всех случаях зависимости (рис. 3) удовлетворительно аппроксимируются суммой убывающих экспоненциальных функций:

$$\sigma = \sigma_0 + a_1 \exp(-c/b_1) + a_2 \exp(-c/b_2).$$

Из рис.2-3 и табл.1 следует, что концентрация пенообразователя должна быть не более 1,25%, а C-3 и ЛСТ не более 2 %.

Если ввести в воду или в водную «вытяжку» цемента вместе с пенообразователем ПБ-2000 (1,25%) суперпластификаторы C-3 или ЛСТ, то наблюдается синергизм их влияния на снижение поверхностного натяжения (рис.4) – оно становится меньше их аддитивного значения.

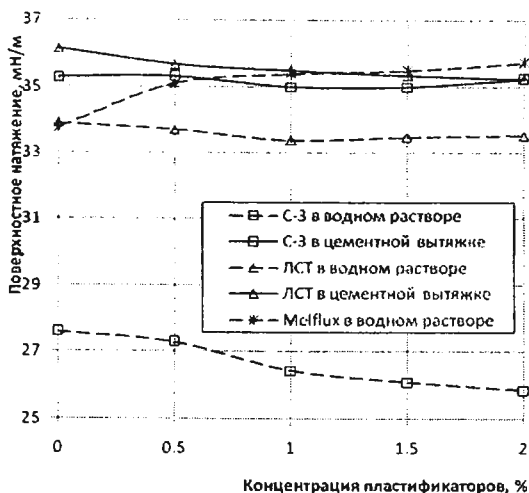


Рис.4. Зависимость поверхностного натяжения водного раствора ПБ-2000 (1,25%) от концентрации пластификатора

Показано, что введение в водный раствор пенообразователя ПБ-2000 пластификаторов С-3 и ЛСТ уменьшает его поверхностное натяжение на 63 мН/м и 55 мН/м, что соответственно, увеличивает кратность пены до 9 и 10.

В случае Melflux, наоборот, поверхностное натяжение 1,25% раствора ПБ-2000 увеличивается с  $\sigma = 33,8$  мН/м до  $\sigma = 35,8$  мН/м, а кратность пены закономерно уменьшается с 8,5 до 7,5.

Поверхностное натяжение водной вытяжки цемента ( $\sigma = 78$  мН/м) выше поверхностного натяжения «чистой» воды ( $\sigma = 72$  мН/м), поэтому и кратность пены из нее, соответственно, ниже при введении различных ПАВ.

Значение кратности пены в присутствии ПО Адимент значительно ниже, чем у ПБ-2000, поэтому дальнейшие исследования проводили с пенообразователем ПБ-2000.

Состав сухой смеси для получения пенобетона включает: 1-портландцемент, как основное вяжущие и как химический реагент, превращающий жидкий ПО в твердый продукт, 2- жидкий пенообразователь ПБ-2000, 3- пластификатор С-3 или ЛСТ и, при необходимости, 4- наполнитель.

Исходя из двойной функции портландцемента, предложенная нами двухэтапная схема изготовления сухой смеси для пенобетона трансформируется в одноэтапную, а именно, в одновременное смешение всех исходных компонентов, в т.ч. водного раствора пенообразователя в одном смесителе. Но с целью механоактивации цемента целесообразно осуществить процесс смешения в мельнице, обеспечив при этом и высокую гомогенизацию сухой смеси.

Гиперпластификатор Melflux оказывает противоположное действие – поверхностное натяжение с увеличением его концентрации в смеси с ПБ-2000 растет.

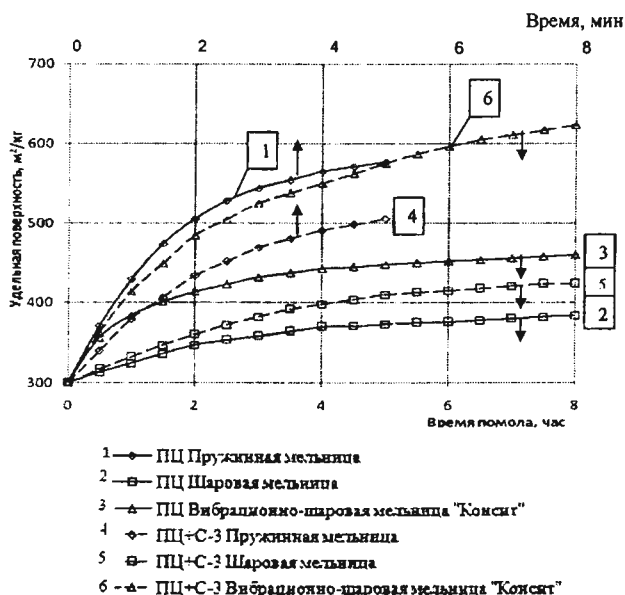
Выявлена зависимость между величиной поверхностного натяжения водного раствора пенообразователя и кратностью полученной из него пены: так кратность пены из 1,25% р-ра ПБ-2000 имеющего  $\sigma = 28$  мН/м равна 8,5, а из раствора Адимента ( $\sigma = 46,8$  мН/м) – 3,5.

Схема производства сухой смеси представлена на рис.5. При необходимости использования мелкого заполнителя (песка) в «тяжелом» пенобетоне он будет вводиться на последнем этапе перемешивания.



Рис.5. Схемы производства сухой смеси для пенобетона

Для оптимизации процесса приготовления сухой смеси необходимо выбрать тип мельниц и определить влияние ПАВ: суперпластификаторов и пенообразователей, как потенциальных интенсификаторов помола, на размолоспособность портландцемента. Размолоспособность оценивалась по кинетике роста удельной поверхности при помоле ПЦ в трех типах мельниц (рис.6).



Видно, что эффективность пружинной мельницы выше шаровой и вибрационно – шаровой в десятки раз, однако промышленные агрегаты такого типа на рынке отсутствуют, и поэтому нами для эксперимента выбраны имеющие промышленные аналоги лабораторная вибрационно – шаровая мельница "Консит" и вибрационная СМВ -3 производства ООО «Опытный завод со спецбюро» (г. Москва).

Рис.6. Кинетические кривые помола исходного ПЦ и ПЦ с суперпластификатором С-3 в трех типах мельниц

Кривые размоловоспособности (рис.6) описываются экспоненциальной функцией:  $y = y_0 + a[1 - \exp(-t/T_0)]$ , где коэффициенты отражают влияние на помол:  $y_0$  – первоначальная удельная поверхность,  $a$  – критерий эффективности мельницы,  $t$  – время помола,  $T_0$  – эффективное время изменения скорости увеличения удельной поверхности (табл. 2).

Таблица 2

Коэф.	Шаровая		Вибро-шаровая «Консит»		Пружинная	
	б/д (кр. 2)	С-3(кр. 5)	б/д (кр. 3)	С-3 (кр. 6)	б/д (кр. 1)	С-3 (кр. 4)
$y_0$	298.53±1.353	297.341±1.46	300	298.81±2.36	297.933±2.15	297.341±1.44
$a$	88.222±0.666	140.988±0.695	123.63±0.808	206.404±20.73	263.424±0.42	140.98±0.661
$T_0$	2.639±0.3018	3.281±0.323	1.894±0.038	1.526±0.177	0,0276±0.476	0,05468±0.32

Из табл.2 и рис.6 видно, что коэффициент  $a$  характеризует эффективность мельницы, его увеличение соответствует уменьшению времени помола.

На рис. 7 представлены кинетические кривые помола ПЦ с С-3 (2%) и с ПБ-2000 (1%) раздельно и с их смесью в вибрационной мельнице СМВ -3.

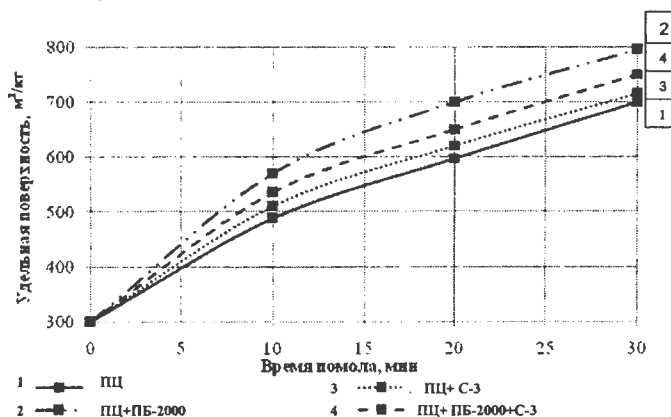


Рис.7. Кинетические кривые помола в вибрационной мельнице СМВ -3

Видно, что С-3 (кр.3) и ПБ-2000(кр.2) интенсифицируют помол, причем пенообразователь в большей степени. Их совместное влияние на помол носит аддитивный характер (кр.4). А скорость помола ПЦ в вибрационной мельнице оказалась в 15-20 раз выше, чем в вибрационно – шаровой «Консит» (кривые на рис.6).

Зависимость удельной поверхности сухой смеси от содержания ПБ-2000 имеет максимум в интервале 0,5 – 1,0% от массы Ц, который и принят как оптимальный.

Известно, что удельная поверхность цемента характеризует его активность, тогда как его гранулометрический состав, а именно, распределение частиц по размерам (РЧР) определяет кинетику твердения вяжущего в ранние и поздние сроки

твердения, а также технологические свойства пенобетонной смеси и свойства готового материала.

На рис.8,9 представлены кривые РЧР продуктов помола ПЦ до удельной поверхности  $600 \text{ м}^2/\text{кг}$ . При введении индивидуальных ПАВ: ПБ-2000 (рис.8) и С-3 кривые носят одномодальный характер, с тенденцией роста левой ветви (тонкодисперсных частиц). Совместное введение этих двух ПАВ приводит к полимодальности кривой РЧР с двумя плечами на левой ветви, причем доля частиц менее  $5 \text{ мкм}$  достигает  $1/3$  от общего числа (рис.9).

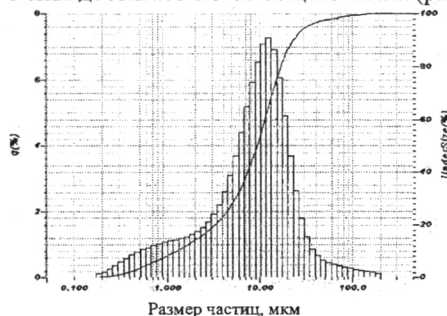


Рис. 8. Распределение частиц ПЦ, измельченного с ПБ-2000 (1%) в вибрационной мельнице

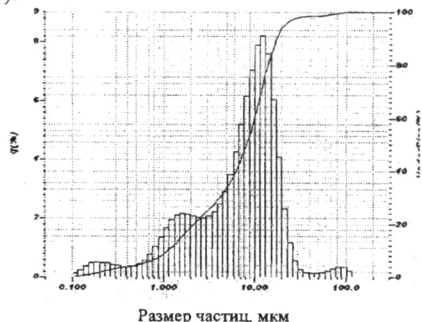


Рис.9. Распределение частиц ПЦ, измельченного с С-3 (2%) и с ПБ-2000 (1%) в вибрационной мельнице

Полученный дисперсный состав активированного вяжущего предопределяет ускоренную и более полную гидратацию, благоприятную для формирования начальной структуры твердой фазы неавтоклавно пенобетона. Это также подтверждается расчетом степени гидратации (СГ) по данным рентгенофазового анализа продуктов гидратации исходного портландцемента ( $S_{уд}=300 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), отвержденного в присутствии ПБ-2000 и ЛСТ (рис.10) и после совместного помола с добавками пенообразователя ПБ - 2000 и пластификатора ЛСТ (сухая смесь для пенобетона -  $S_{уд}=600 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) (рис.11) и данными кондуктометрии этих составов.

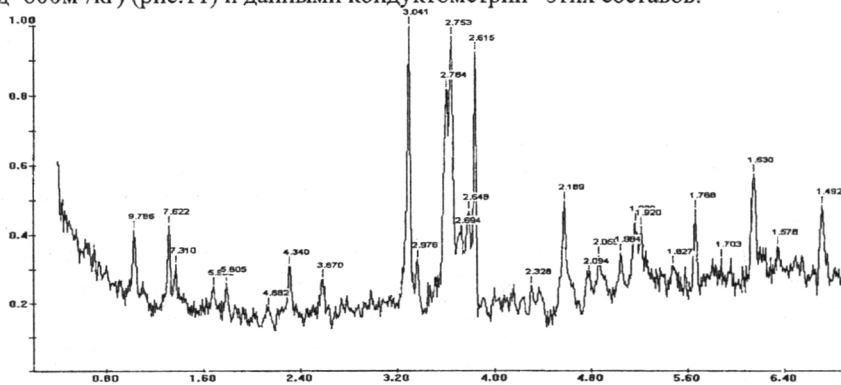


Рис.10. Дифрактограмма цементного камня из исходного портландцемента ( $S_{уд}=300 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), отвержденного в присутствии ЛСТ и ПБ-2000

$$СГ_{ц+пав} = \frac{I_{портландит} + I_{эттрингит}}{I_{алит} + I_{портландит} + I_{эттрингит}} = \frac{0 + 292}{683 + 0 + 292} = 0,3$$

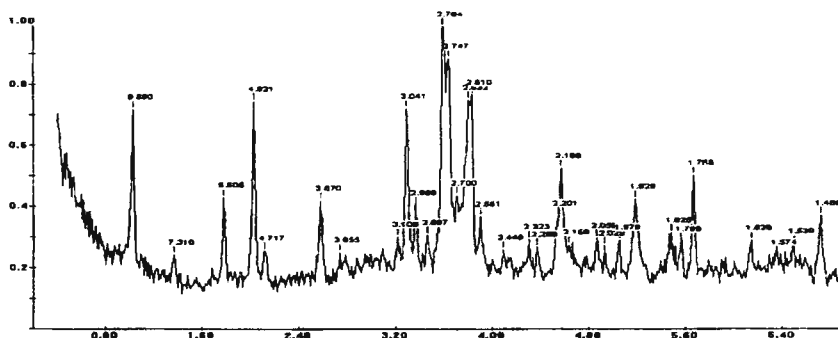


Рис.11. Дифрактограмма цементного камня, полученного из сухой смеси (Суд=600м²/кг)

$$СГ_{сспб} = \frac{I_{портландит} + I_{эттрингит}}{I_{алит} + I_{портландит} + I_{эттрингит}} = \frac{490 + 473}{582 + 490 + 473} = 0,6$$

Из расчета видно, что СГ сухой смеси в 2 раза выше (0,6), чем рядового ПЦ с добавками ПАВ (СГ=0,3). Таким образом, механоактивация ПЦ в присутствии ПАВ позволяет компенсировать их замедляющие действие.

Кинетика твердения ССПБ и, для сравнения, ПЦ + (ПБ-2000+ЛСТ) оценивалась кондуктометрическим методом. В обоих случаях удельная электропроводимость описывается линейной функцией, для ССПБ  $y=68,29 \cdot X + 3069$  ( $R^2=0,998$ ), а для исходного портландцемента (Суд=300м²/кг), твердеющего в присутствии ПБ-2000 и ЛСТ -  $y = 38,26 \cdot X + 3852$  ( $R^2=0,993$ ). Из коэффициентов этих уравнений видно, что скорость изменения электропроводимости твердеющей сухой смеси почти в 2 раза выше (68,29), чем рядового ПЦ с теми же добавками ПАВ (38,26).

На основе полученных результатов подобраны составы сухих смесей (табл.3), предназначенные для получения пенобетона с плотностью 400,500,600, со следующими основными показателями качества сухих смесей: удельная поверхность не менее 550 м²/кг, насыпная плотность не более 1000 кг/м³, влажность не более 1 %, сохраняемость свойств в плотно закрытых полиэтиленовых мешках не менее 3 месяцев; продолжительность перемешивания после затворении водой не более 4 мин, подвижность пенобетонной смеси (по Суттарду) 118-130 мм. Разработан проект нормативно – технического документа ТУ 5745-001-60222454-2010 «Сухие смеси для неавтоклавного пенобетона».

Особенностью разработанных сухих смесей является возможность изготовления из каждого базового состава трех марок пенобетона по плотности путем изменения водотвердого отношения (табл.4).

**Четвертая глава** посвящена технологии получения пенобетона из сухих смесей и физико - механическим и другим свойствам пенобетона из сухих смесей. Для получения пенобетонных смесей сухие смеси затворяют заданным количеством воды и перемешивают в высокоскоростном смесителе (время и частота оборотов которого оптимизированы, например, интенсивность перемешивания пенобетонной смеси D500 (ССПБ 500-I) должна составлять 1500 об/мин в течение 2 – 4 мин). Свойства пенобетонных смесей приведены в табл.4.

Таблица 3

Составы сухих смесей (базовые) для пенобетона различных средних плотностей

Обозначение сухой смеси	Средняя плотность пенобетона, кг/м <sup>3</sup>	Расход материалов на 1т сухой смеси			
		цемент, кг	заполнитель, кг	пластификаторы, кг	ПБ-2000, л
ССПБ 400-I	400	982	-	9,9	8,8
ССПБ 500-I	500	770	222	7,7	5,1
ССПБ 600-I	600	690	303	6,9	3,3

Таблица 4

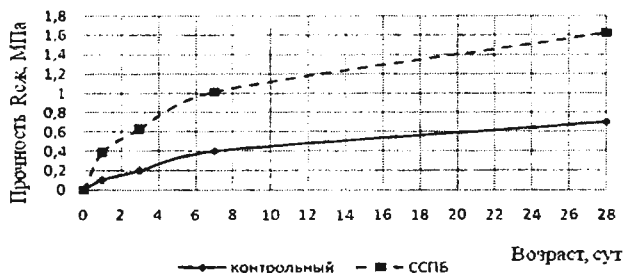
Составы и свойства пенобетонных смесей разных марок

Средняя плотность пенобетона, кг/м <sup>3</sup>	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup>			В/Т	Распływ по Суттарду, мм
	базовый состав	кол-во ССПБ, кг	В, л		
D 300	ССПБ 400-I	335	147	0,43	129
D 400			136	0,405	125
D 500			127	0,38	120
D 400	ССПБ 500-I	450	205	0,45	124
D 500			187	0,415	122
D 600			165	0,365	119
D 500	ССПБ 600-I	550	258	0,47	123
D 600			231	0,42	119
D 700			205	0,37	118

Характерной особенностью пенобетона из сухих смесей является низкая первоначальная влажность (15-18%), обусловленная низким В/Т отношением, и как следствие, низкая естественная усадка пенобетона D400 - 1,78 мм/м (влажность 5-7% после 7 суток естественного твердения). Другим следствием низкого В/Т и, особенно, механоактивации вяжущего является большая скорость твердения и, как было показано выше (стр.13), большая степень гидратации. Кинетика набора прочности пенобетона из ССПБ в естественных условиях (W=55%, t=25<sup>0</sup>C) в срав-

нении с пенобетоном, изготовленным по традиционной технологии представлена, на рис.12.

Свойства неавтоклавного пенобетона, полученного из сухой активированной смеси, показаны в табл.5 в сравнении с пенобетоном и газобетоном известных производителей.



Видно преимущество пенобетона из ССПБ в темпе набора прочности и в ее абсолютных значениях.

Рис.12. Кинетика набора прочности пенобетона в естественных условиях

Таблица 5

Свойства ячеистых бетонов

Производитель	Свойства пенобетона					
	D, кг/м <sup>3</sup>	R сж, МПа	λ, Вт/м К	F, цикл	ε, мм/м	μ, мг/(мчПа)
Пенобетон из сухой смеси (КГАСУ)	400	1,5 -1,7	0,09	35	2,5	0,24
	600	2,8 – 3,0	0,12	35	1,7	0,18
Пенобетон (однотайпная тех-я) «СОВБИ»	400	0,5-1,1	0,085	не норм.	не норм.	0,22
Требования ГОСТ для пенобетона	400	0,7 – 1,1	0,1	не норм	не норм	0,23
Требования ГОСТ для газобетона	400	1,5 – 2,1	0,1	не норм	не норм	0,23
Газобетон «КЗССМ» (г. Казань)	400	2,32	0,095	25	1,0	0,23
Газобетон ОАО ЗЯБ (г.Наб. Челны)	400	2,24	0,095	25	1,0	0,23
	600	3,02	0,14	25	0,5	0,17
Газобетон «ВЗСМ ВІКТОН» (г. Волжск)	400	1,8-2,4	0,095	25	0,5	0,23

Из табл.5 видно, что пенобетон из сухой смеси по основным показателям: прочности, морозостойкости, трещиностойкости (по усадке) превосходит нормативные требования к пенобетону и показатели ведущего производителя пенобетона в России - СОВБИ. При этом он приближается к автоклавному газобетону, а по морозостойкости значительно превосходит его.



Технология получения ПБ из сухих смесей позволяет более эффективно применять тонкодисперсные, в т.ч. волокнистые модификаторы. Их следует вводить в СС при помоле, что обеспечит им хорошую гомогенизацию и активацию. В качестве таковых использовали хризотилковый асбест, таурит, льноволокно, кремнезоль, базальтовое волокно, которые вводили в ССПБ 400 в количестве 0,2% от цемента при помоле. Установлено, что таурит, хризотилковое и базальтовое волокна повышают прочность пенобетона в возрасте 28 сут. на 11%, 18%, 15 % соответственно, что подтверждает большие возможности новой технологии пенобетона.

Таким образом, полученные результаты подтверждают эффективность разработанной технологии: превышены нормативные показатели по марочной прочности, морозостойкости и снижена усадка. Установлено, что максимальная величина влажностной усадки пенобетона малой плотности (до D400) не превышает известных предельных значений (3,0-5,0 мм/м).

Ячеистая структура пенобетона, представленная электронной микрофотографией (рис.13), имеет полидисперсный характер, пористость пенобетона плотностью D400 составляет 79 %, а D600 – 74 %.

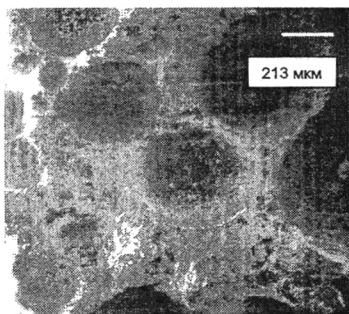


Рис.13. Поровая структура пенобетона из ССПБ плотностью D 400

Известно, что увеличение объема мелких пор в пенобетоне повышает его морозостойкость и стойкость к агрессивным средам, поэтому, регулируя пористость в сторону уменьшения размера пор, можно повысить долговечность материала. Из распределения пор по размерам (рис.14) следует, что основной их размер находится в интервале 150 – 500 мкм, что обеспечивает пенобетону из ССПБ высокие эксплуатационные свойства.

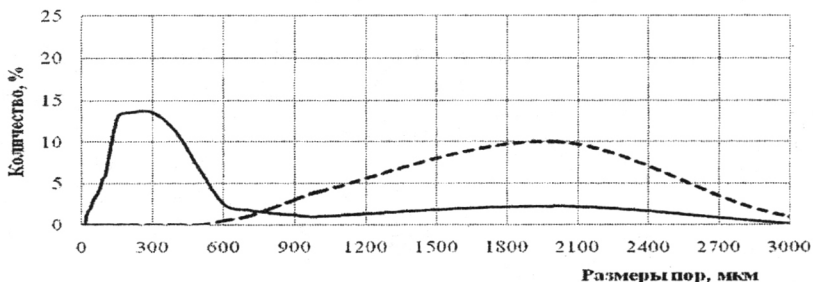


Рис.14. Распределение пор пенобетона D400 по размерам

В пятой главе дана технико – экономическая оценка технологии производства неавтоклавного пенобетона из сухой смеси. Она достаточно проста, ее аппаратурное оформление, малозерно -, и металлоемко (рис.15).

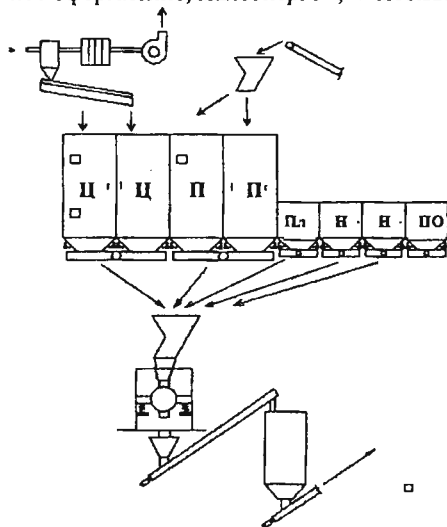


Рис.15. Технологическая схема производства ССПБ

Производство сухой смеси состоит из расходных бункеров цемента (Ц), песка (П), пластификатора (Пл), наполнителей (Н) и пенообразователя (ПО). Компоненты сухой смеси измельчают в вибрационно-шаровой мельнице типа СМВ-3 периодического действия (производства ООО «Опытный завод со спецбюро», г. Москва). После измельчения полученная сухая смесь подается в накопительную емкость.

На базе экспериментальных данных разработан технологический проект производства ССПБ мощностью 15000 тн в год.

На заводе предусмотрено использование сухой смеси не только в качестве товарного продукта (для стороннего потребителя смесь упаковывают в мешки 25 и 50 кг с помощью фасовочной машины), но и для собственного производства неавтоклавных пеноблоков (по конвейерной технологии).

Смешение ССПБ с водой производится в турбулентном смесителе, где происходит образование пенобетонной массы. После ее заливки в формы они выдерживаются в камере при температуре 25-30°C в течение 8 часов. Затем пеноблоки извлекаются из форм и в течение 7 суток «дозревают» на складе при температуре не ниже +15°C.

Расчетная стоимость сухих смесей и пенобетона из них приведена в табл.6.

Таблица 6

Стоимость сухой смеси и пенобетона в сравнении с пенобетоном и газобетоном известных производителей

Сухая смесь (Каз ГАСУ), руб/т		Пенобетон (КазГАСУ), руб/м <sup>3</sup>		Газобетон ОАО ЗЯБ (г.Наб. Челны), руб/м <sup>3</sup>		Газобетон «КЗССМ» (г. Казань), руб/м <sup>3</sup>	Газобетон «ВЗСМ ВИКТОН», руб/м <sup>3</sup>	Пенобе- тон СОВБИ, руб/м <sup>3</sup>
ССПБ 400-I	ССПБ 600-I	D400	D600	D400	D600	D400,600	D600	D400
4275	3320	2520	2840	2790	2990	3200	3200	2650

Таким образом, разработаны физико – химические и технологические основы получения механоактивированных сухих смесей для производства неавтоклавных пенобетонов, которые по главным техническим показателям превосходят аналогичные пенобетоны, получаемые по традиционным технологиям и незначительно уступают автоклавным газобетонам.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. С целью обеспечения стабильности свойств неавтоклавного пенобетона и повышения его эксплуатационно-технических свойств и упрощения технологии производства предложен и реализован принцип его получения из сухой смеси, включающий процесс перевода водного раствора пенообразователя в твердый продукт, механоактивацию вяжущего при одновременном помоле всех компонентов в мельнице. Установлено преимущество портландцемента как гидратационной добавки для связывания воды из растворов пенообразователей, перед негашеной известью и полуводным гипсом, т.к. это приводит к 30% повышению прочности пенобетона по сравнению с пенобетоном из жидкого пенообразователя.

2. Изучено влияние пяти видов промышленных пенообразователей на сроки схватывания цемента. Установлено, что синтетический пенообразователь ПБ-2000 и белковый пенообразователь «Адидент» в отличие от ПО-6, ПО-6ТС, МТ сокращают сроки начала схватывания: - на 30 мин, а конец - на час. Это объясняется наличием в составе «Адидента» хлорида кальция, а в ПБ-2000 - водорастворимых сульфатов, ускоряющих процесс гидратации.

3. Методом Дю – Нуи изучено поверхностное натяжение воды и водной вытяжки цемента при введении пенообразователей и пластификаторов, отдельно и совместно. Выявлены математические зависимости (убывающие экспоненциальные функции) поверхностного натяжения от концентрации и вида пенообразователя. Выявлена прямая зависимость между величиной поверхностного натяжения водного раствора пенообразователя и кратностью полученной из него пены.

4. Исследовано влияние пластификаторов различной химической природы на кратность пены, полученной из водного раствора пенообразователя ПБ-2000. Показано, что введение пластификаторов С-3 и ЛСТ, уменьшая поверхностное натяжение, увеличивает кратность пены с 8,5 до 9 и 10, соответственно. В отличие от них, гиперпластификатор Мелфлюкс увеличивает поверхностное натяжение, с  $\sigma = 33,8$  мН/м до  $\sigma = 35,8$  мН/м и потому кратность пены закономерно уменьшается с 8,5 до 7,5.

Выявлено синергическое влияние смеси пластификаторов С-3 и ЛСТ с пенообразователем ПБ-2000 на снижение поверхностного натяжения воды.

5. Исследована размолоспособность портландцемента (кинетика роста удельной поверхности –  $S_{уд}$ ) в присутствии пенообразователя ПБ-2000 и пластификатора С-3 в четырех типах мельниц: вибрационно-шаровой, шаровой, пружинной и вибрационной. Выявлено, что размолоспособность повышается в ряду: шаровая, вибрационная – шаровая, вибрационная, пружинная. Установлено, что все кривые размолоспособности описываются экспоненциальными функциями.

6. Исследовано влияние ПАВ на процесс помола портландцемента и выявлена экстремальная зависимость размоловоспособности от концентрации пенообразователя (с максимумом при 0,5 – 1,0 %). Пенообразователь ПБ-2000 является лучшим интенсификатором помола портландцемента, чем С-3. Совместное влияние двух этих ПАВ на размоловоспособность носит аддитивный характер.

7. Исследован дисперсный состав продуктов помола сухой смеси в вибрационно-шаровой и вибрационной мельницах с помощью лазерного анализатора «HORIBA LA-950 V2». Выявлено, что при одинаковой удельной поверхности кривая РЧР смеси, полученной на вибрационной мельнице, значительно смещена в сторону «левого плеча», и характер распределения частиц по размерам предопределяет ускоренную и более полную гидратацию вяжущего, благоприятную для формирования начальной структуры неавтоклавного пенобетона, подтвержденную данными рентгенофазового анализа продуктов гидратации сухой смеси.

8. Исследованы основные показатели неавтоклавного пенобетона из сухой смеси: прочность и усадка. Прочность на сжатие ПБ из сухой смеси плотностью D 400 находится в пределах 1,5-1,7 МПа, что на 40 – 50 % превосходит пенобетон, изготовленный по традиционным технологиям, усадка ПБ из сухой смеси плотностью D 400 не превышает 2,5 мм/м, в то время как, по ГОСТ 25485 усадка для пенобетона D 400 не нормируется, ввиду ее высоких значений.

9. Разработана принципиальная технологическая схема производства сухой смеси и пенобетона плотностью D400,600 на ее основе. Оптимизированы параметры изготовления пенобетонной смеси (время и число оборотов скоростного смесителя).

10. Разработаны проекты нормативно – технических документов: ТУ 5745-001-60222454-2010 «Сухие смеси для неавтоклавного пенобетона» и «Технологический регламент на изготовление теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных неавтоклавных пенобетонов из сухих смесей». Разработан технологический проект производства сухой смеси для пенобетона и стеновых блоков плотностью D400,600. Рассчитаны экономические показатели производства сухой смеси и пенобетона плотностью D400,600.

Основное содержание работы опубликовано в 8 работах, из которых: 2 опубликованы в журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК:

1. Патент РФ № 2342347 «Способ приготовления сухого тонкодисперсного пенообразователя и способ приготовления сухой сырьевой смеси для пенобетона с использованием этого пенообразователя», приоритет от 18.01.2007, авторы: Хозин В.Г., Магдеев У.Х., Красникова Н.М., Морозова Н.Н., Рахимов М.М.

2. Хозин В.Г., Красникова Н.М., Магдеев У.Х. Сухая смесь для получения пенобетона /Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2008, № 2 - С.32-33.

3. Красникова Н.М., О.В. Хохряков. Сухая механоактивированная смесь для получения неавтоклавного пенобетона / Матер. межд. конгресса «Наука и иннова-

ции в строительстве», Современные проблемы строительного материаловедения и технологии, т.1, книга 1 – Воронеж: ВГАСУ, 2008. - С. 267-271.

4. Красникова Н.М., Хозин В.Г. Новый способ приготовления пенобетона / Известия Каз ГАСУ, 2009, №1 – С.273-276.

5. Красникова Н.М., Морозов Н.М., Хозин В.Г., Бахтиев Л.Н. Влияние пластифицирующих добавок на подвижность и воздухововлечение песчаных бетонов/ Межд.сб. научных трудов «Экология и новые технологии в строительном материаловедении» – Новосибирск, 2010. – С.8-11.

6. Красникова Н.М., Хозин В.Г. Модификация пенобетона тонкодисперсными порошками, содержащими наноразмерные фракции частиц/ Материалы XV академических чтений РААСН межд. научно – технической конф. «Достижения и проблемы материаловедения и моделизации строительной индустрии» – Казань: КГАСУ, 2010. - С.286-288.

7. Красникова Н.М., Хозин В.Г. Новый способ приготовления пенобетона / Вестник Южно-Уральского государственного университета, сер. "Строительство и архитектура", 2010, № 10 - С. 49-50.

8.Хозин В.Г., Хохряков О.В., Якупов М.И., Красникова Н.М., Сибгатуллин И.Р. Влияние ПАВ (суперпластификаторов и пенообразователей) на размолоспособность портландцемента и наполнителей / Науковий Вісник Будівництва, - Харьков, 2010, вип.59 – С.78-90.

9. Красникова Н.М., Хозин В.Г. Влияние водорастворимых ПАВ на степень гидратации портландцемента в пенобетоне / Матер. V Всеросс. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых "Теория и практика повышения эффективности строительных материалов" - Пенза: ПГУАС, 2010. - С.126-129.

Корректурa автора  
Подписано к печати « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010г. Формат 60х84/16 Печать RISO  
Объем 1,0 п.л. Заказ № \_\_\_\_\_ Тираж 100 экз

---

Типография ЗАО «Альфа-Т»  
420029 , Казань , ул. Сибирский тр.,34



